

PERILAKU SERBUK UO_2 HASIL PROSES ADU, AUC, IDR DAN MODIFIED ADU SELAMA PROSES PENYINTERAN MENGUNAKAN DILATOMETER

Tri Yulianto⁽¹⁾ dan Etty Mutiara⁽¹⁾

1. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir- BATAN
Kawasan Puspipetek, Serpong Tangerang

ABSTRAK

PERILAKU SERBUK UO_2 HASIL PROSES ADU, AUC, IDR DAN *MODIFIED* ADU SELAMA PROSES PENYINTERAN MENGGUNAKAN DILATOMETER. Telah dilakukan penelitian perilaku serbuk UO_2 selama penyinteran. Pengamatan perilaku serbuk tersebut dilakukan terhadap empat macam serbuk UO_2 yang diperoleh dari jalur proses yang berbeda yaitu rute ADU, AUC, IDR dan *Modified* ADU. Hal ini bertujuan untuk menentukan serbuk UO_2 yang mempunyai mampu sinter yang baik tanpa perlakuan pengkondisian awal terhadap serbuk tersebut. Dengan demikian proses penyinteran dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah dan waktu lebih singkat sehingga biaya proses peletisasi dapat ditekan. Untuk pengamatan perilaku serbuk selama penyinteran tersebut disiapkan pelet dari masing-masing serbuk yang dikompakkan pada tekanan 3 ton/cm^2 untuk cetakan berdiameter 10,34 mm. Sebelum dilakukan pengompakan, keempat macam serbuk UO_2 tersebut dikarakterisasi untuk mendapatkan data ukuran serbuk rata-rata dan luas muka serbuk. Penelitian ini dilakukan menggunakan tungku sinter yang dilengkapi dilatometer dengan memvariasikan temperatur sinter dengan tiga variasi (1450°C , 1600°C dan 1750°C) untuk penyinteran dengan waktu sinter 4 jam. Hasil pengamatan berupa kurva dilatometer, densitas geometri dan mikrograf SEM pelet sinter yang selanjutnya diolah untuk menentukan mampu sinter masing-masing serbuk. Berdasarkan olahan data hasil pengamatan dapat disimpulkan bahwa serbuk *modified* ADU mempunyai mampu sinter yang paling baik yang ditandai dengan laju penyusutan pelet yang tinggi selama penyinteran sehingga mampu mencapai densitas akhir dan ukuran butir sesuai persyaratan pada temperatur sinter lebih rendah dan waktu sinter yang lebih singkat.

Kata kunci: serbuk UO_2 , mampu sinter, ukuran serbuk, luas muka, densitas, dilatometer.

ABSTRACT

THE BEHAVIOR OF UO_2 POWDER FROM ADU, AUC, IDR AND MODIFIED ADU PROCESSES DURING SINTERING USING DILATOMETER. Research on the behavior of UO_2 powder during sintering has been performed. Observation of the powder behavior is conducted on four types of UO_2 powder prepared from ADU, AUC, IDR and Modified ADU routes. The purpose is to determine UO_2 powder that has good sinterability without pre-conditioning treatment on the powder. Thus the sintering process can be carried out at lower temperature and shorter time that will minimize the cost of pelletization process. To observe powder behavior during sintering, pellets from each type of powder are prepared by means of compacting at a pressure of 3 ton/cm^2 for die of 10.34 mm in diameter. The investigation is performed using sintering furnace that is equipped with a dilatometer

and varying sintering temperature with three variation (1450 °C, 1600 °C and 1750 °C) for hold time of 4 hours. Before compaction, the UO₂ powders are characterized to obtain the average powder size and surface area. Result of the observation are dilatometer curves, pellet density and SEM micrographs of the sintered pellets which are further processed to determine the sinterability of powder. It is concluded that Modified ADU powder has the best sinterability indicated by the activeness and high shrinkage rate during sintering that allow the powder to achieve high final density and grain size as specified at lower sintering temperature and shorter sintering time.

Keyword : UO₂ powder, sinterability, powder size, surface area, density, dilatometer.

PENDAHULUAN

Dalam fabrikasi elemen bakar khususnya pada proses peletisasi dapat digunakan berbagai kualitas serbuk UO₂ yang diperoleh dari jalur fabrikasi tertentu. Serbuk ini memiliki karakteristik tertentu tergantung jalur proses fabrikasinya seperti serbuk UO₂ dari rute ADU, AUC dan IDR^[1, 2, 3]. Ada dua tahapan utama yang harus dilalui oleh serbuk UO₂ pada proses peletisasi tersebut yaitu proses pengompakan serbuk dan penyinteran pelet mentah. Walaupun digunakan berbagai serbuk dengan karakteristik yang berbeda, pelet sinter yang dihasilkan harus memenuhi persyaratan tertentu yang telah ditetapkan antara lain mempunyai densitas yang tinggi ($\geq 95\%$ TD), ukuran butir berkisar antara 5 – 25 μm dan ratio O/U yang mendekati 2,0^[4]. Agar persyaratan itu dapat dipenuhi oleh setiap jenis serbuk maka perlu dipahami faktor-faktor yang berpengaruh pada tiap tahapan proses tersebut.

Proses penyinteran adalah proses pemanasan pelet mentah agar terjadi densifikasi yang dikendalikan oleh proses difusi dan umumnya dilaksanakan pada temperatur sekitar 0,55 – 0,6 titik leleh serbuk. Pada proses penyinteran pelet UO₂ densifikasi terjadi dengan cara mereduksi pori dan penyusutan (*shrinkage*) sehingga dapat meningkatkan densitas pelet mentah hingga mencapai 95% densitas teoritisnya. Proses penyinteran diawali dengan pembentukan *necking* pada titik kontak antar partikel, dilanjutkan dengan pembentukan batas butir

dan pengecilan pori yang sudah saling menyambung.

Sebagaimana diketahui bahwa pada setiap tahapan proses, faktor utama yang berpengaruh terhadap kualitas hasil adalah parameter proses itu sendiri. Parameter proses tersebut akan berpengaruh pada kemudahan pencapaian kualitas pelet yang dipersyaratkan. Parameter yang berpengaruh pada proses penyinteran antara lain temperatur, waktu, laju pemanasan dan pendinginan serta media penyinteran. Pelet UO₂ umumnya disinter pada temperatur 1600 – 1800 °C dengan waktu penyinteran sekitar 4 jam menggunakan media penyinteran H₂. Penggunaan temperatur sinter yang tinggi dengan media penyinteran reduktif merupakan upaya untuk mempermudah pencapaian persyaratan yang harus dipenuhi oleh pelet UO₂^[4]. Waktu sinter (*hold time*) dimaksudkan untuk memberi kesempatan pada butir yang sudah saling menyatu untuk tumbuh hingga diperoleh ukuran butir berkisar antara 5 – 25 μm ^[4]. Laju pemanasan dan pendinginan berpengaruh pada integritas pelet. Apabila laju terlalu tinggi dapat menyebabkan pelet menjadi retak terutama pada tahap pendinginan karena konduktifitas keramik yang rendah.

Selain parameter proses, hal lain yang berpengaruh pada kualitas pelet hasil penyinteran adalah karakteristik serbuk yang digunakan, salah satunya adalah sifat mampu sinter serbuk UO₂. Menurut Dorr & Assmann, sifat mampu sinter serbuk merupakan *driving force* dari sistem yang akan menentukan laju

penyinteran dan densitas akhir pellet ^[4]. *Driving force* tersebut berupa perubahan energi permukaan dan energi batas butir selama sintering ^[4]. Mampu sinter dapat direfleksikan dengan kecepatan terjadinya penyusutan (*shrinkage*) pada saat penyinteran. Serbuk UO_2 dengan mampu sinter yang baik akan memberikan laju penyusutan yang tinggi pada temperatur lebih rendah dari 1750 °C atau pencapaian densitas akhir yang lebih cepat pada temperatur sinter lebih rendah.

Hasil penelitian menyebutkan bahwa serbuk dengan mampu sinter yang baik adalah serbuk yang tersusun dari partikel dengan ukuran sangat halus sehingga mempunyai luas permukaan partikel yang besar ^[5,6]. Serbuk halus adalah serbuk yang berukuran < 150 μm . Ukuran serbuk yang halus akan memperbesar luas permukaan spesifik serbuk^[7] dan meningkatkan luas kontak antar butir^[8-10]. Hal ini dapat meningkatkan laju penyinteran karena meningkatnya energi aktivasi permukaan dengan semakin besarnya luas permukaan spesifik serbuk^[4].

Agar diperoleh dasar untuk penentuan serbuk UO_2 dengan mampu sinter yang baik dan parameter proses penyinteran yang sesuai maka perlu dilakukan penelitian perilaku serbuk tersebut selama penyinteran. Pada penelitian ini diamati perilaku empat jenis serbuk UO_2 yang berasal dari rute ADU, AUC, IDR (*Integrated Dry Process*) dan *Modified* ADU. Proses perolehan serbuk rute *Modified* ADU merupakan kombinasi dari rute ADU (proses basah) dan IDR (proses kering) yang dimaksudkan untuk perbaikan kualitas serbuk rute ADU.

Proses penyinteran yang dipilih pada penelitian ini adalah proses penyinteran standard untuk pelet UO_2 dengan temperatur antara 1600 – 1800°C selama 4 jam menggunakan media penyinteran gas hydrogen ^[4]. Perilaku serbuk selama penyinteran akan ditampilkan dalam bentuk

kurva dilatometer yang memberikan gambaran sifat mampu sinter serbuk. Sifat mampu sinter digambarkan dengan laju dan temperatur penyusutan pelet UO_2 yang merupakan tahap awal penyinteran dan pertumbuhan butir sebagai tahap akhir proses penyinteran. Pengamatan proses penyusutan dilakukan dengan menggunakan tungku sinter yang dilengkapi dengan dilatometer yang akan memberikan informasi tentang temperatur, besar dan laju penyusutan pelet. Pengamatan pengaruh temperatur dan waktu sinter terhadap densitas pelet dilakukan dengan menggunakan tungku sinter tanpa dilatometer. Kemudian pengamatan ukuran butir pada pelet sinter berupa mikrograf struktur mikro menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*).

TATA KERJA

Pada penelitian ini digunakan empat macam serbuk UO_2 berasal dari proses rute ADU, AUC, IDR (*Integrated Dry Process*) dan *Modified* ADU. Terhadap masing-masing serbuk dilakukan analisis sifat fisis berupa penentuan ukuran serbuk rata-rata dan luas muka spesifik serbuk. Keempat kelompok serbuk ini selanjutnya dikenai proses pengompakan dengan tekanan pengompakan yang sama yaitu sebesar 3 ton/cm² (untuk diameter cetakan 10,34 mm) menggunakan mesin press hidrolik. Pelet mentah yang dihasilkan selanjutnya diamati keutuhannya dan diukur densitasnya dengan cara mengukur tinggi dan diameter pelet serta menimbang beratnya. Densitas pelet dinyatakan dalam bentuk prosentase densitas teoritis UO_2 (%TD).

Untuk mengevaluasi perilaku masing-masing serbuk selama proses penyinteran dibutuhkan kurva dilatometer yang memberikan informasi tentang temperatur mulai terjadi, besar dan laju penyusutan pelet. Kurva dilatometer ini diperoleh dari penyinteran pelet yang dilakukan pada

temperatur 1750°C, waktu sinter 4 jam dan laju pemanasan 600°C/jam menggunakan tungku sinter yang dilengkapi dilatometer. Dilatometer ini dilengkapi dengan sensor posisi pelet yang diamati berdasarkan pemanfaatan sinyal dari *linear variable differential transformer* (LVTD) yang menjadi masukan pada meter pembaca langsung dan pada *recorder*.

Selanjutnya untuk mengetahui karakteristik serbuk dan pengaruh parameter proses pada kualitas pelet sinter maka pelet mentah tiap jenis serbuk disinter menggunakan tungku sinter tanpa dilatometer pada temperatur 1450°C, 1600°C dan 1750°C dengan waktu sinter 4 jam dan penyinteran tanpa waktu sinter (*hold time*) dengan cara mematikan tungku setelah temperatur sinter tercapai. Adapun kualitas pelet hasil penyinteran yang diamati berupa kenaikan densitas pelet mentah-sinter dan ukuran butir pelet sinter dari keempat macam serbuk UO_2 tersebut. Untuk mengamati proses pertumbuhan butir berupa struktur mikro pelet hasil sinter digunakan Scanning Electron Microscope (SEM). Selanjutnya data hasil

pengamatan yang diperoleh diolah untuk mengetahui pengaruh parameter proses penyinteran dan menentukan mampu sinter serbuk.

HASIL DAN PEMBAHASAN

• Kondisi awal serbuk dan densitas pelet

Mentah

Hasil analisis sifat fisis yang dilakukan terhadap empat macam serbuk awal yang digunakan berupa data ukuran partikel serbuk rata-rata dan luas muka spesifik masing-masing serbuk UO_2 sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 1. Ukuran partikel serbuk ADU dan *Modified* ADU hampir sama yaitu 1,08 dan 1,29 μm , sedangkan serbuk AUC mempunyai ukuran partikel yang lebih besar yaitu 2,58 μm . Luas muka spesifik serbuk *Modified* ADU lebih besar dari serbuk AUC, hal ini sejalan dengan teori yang menyatakan semakin kecil ukuran serbuk maka luas muka spesifik serbuk makin tinggi. Namun teori tersebut tidak mendukung data hasil pengukuran luas muka spesifik serbuk ADU dan IDR sehingga perlu penelitian lebih lanjut untuk perolehan data yang lebih akurat.

Tabel 1. Ukuran partikel serbuk rata-rata, luas muka spesifik (m^2/g) dan Densitas pelet mentah (%TD) masing-masing serbuk.

Serbuk	Ukuran partikel serbuk rata-rata (μm)	Luas muka spesifik (m^2/g)	Densitas pelet mentah (%TD)
ADU	1,08	2,12	53,70
AUC	2,58	5,50	50,54
IDR	0,60	2,10	51,10
<i>Modified</i> ADU	1,29	9,20	49,40

Sifat mampu tekan (*compressibility*) masing-masing serbuk dapat diketahui melalui densitas pelet mentah hasil proses pengompakan pada tekanan 3 ton/cm^2

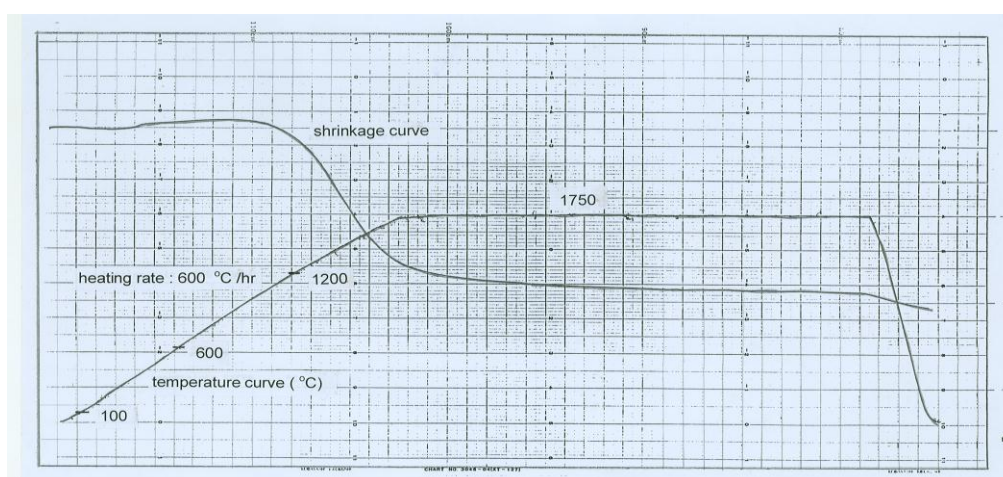
sebagaimana diperlihatkan oleh Tabel 1. Pada tabel tersebut terlihat bahwa pembuatan pelet mentah menggunakan serbuk ADU dengan ukuran partikel rata-rata

yang lebih kecil dari serbuk AUC memberikan densitas pelet mentah serbuk ADU yang lebih tinggi. Hal ini bertentangan dengan penelitian yang menyatakan bahwa serbuk halus akan menurunkan sifat mampu tekan dan mampu kompak dari serbuk karena adanya friksi antar partikel yang cukup besar^[1]. Demikian pula yang terjadi dengan serbuk ADU dan *modified* ADU. Namun ada teori dan hasil penelitian yang menyatakan bahwa densitas pelet mentah tergantung pada distribusi ukuran serbuk bukan pada ukuran serbuk rata-rata^[6, 8, 10]. Densitas pelet mentah yang tinggi dapat dicapai oleh serbuk dengan distribusi ukuran partikel tertentu yang mampu meminimalkan prosentase rongga antar serbuk yang lebih besar melalui pengisian rongga tersebut oleh partikel dengan ukuran yang lebih kecil. Salah satu hasil penelitian pengaruh distribusi ukuran partikel pada densitas pelet mentah menyatakan bahwa serbuk yang tersusun dari 60% serbuk berukuran $<150 \mu\text{m}$ dan 40% serbuk berukuran $150 \mu\text{m} < x < 800 \mu\text{m}$ memberikan densitas pelet mentah paling tinggi diantara beberapa variasi yang dilakukan yaitu sebesar $5,8479 \text{ g/cm}^3$ ^[6]. Bila dikaitkan dengan teori dan hasil penelitian ini,

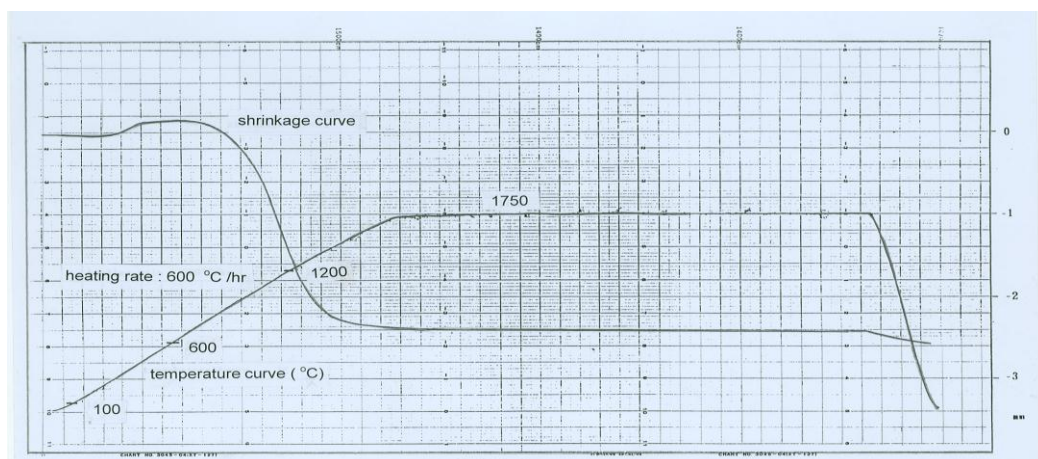
ada dugaan bahwa serbuk ADU mempunyai mampu tekan yang lebih baik dibandingkan tiga serbuk lainnya karena mempunyai komposisi dan distribusi ukuran partikel yang lebih mendekati kondisi sesuai hasil penelitian di atas. Tetapi hal ini memerlukan pembuktian lebih lanjut berupa data dukung distribusi ukuran keempat serbuk tersebut dengan sifat mampu tekannya.

• Mampu sinter serbuk

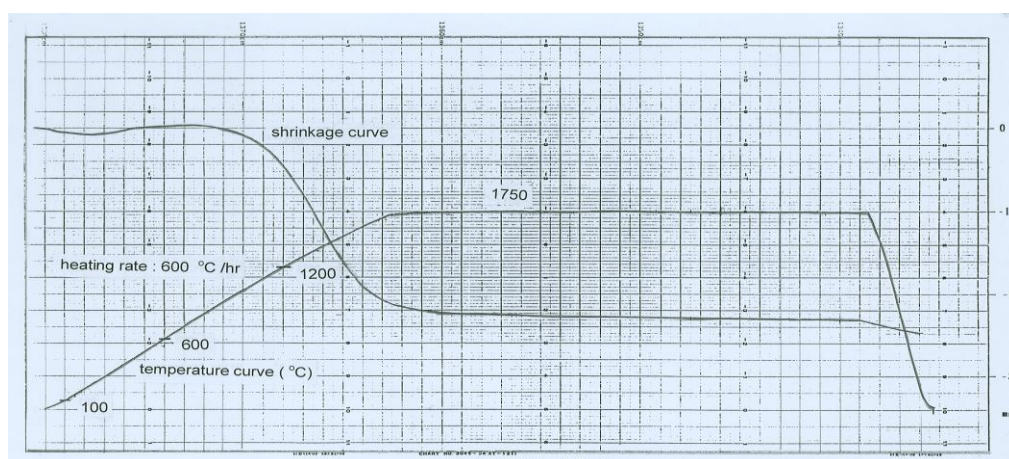
Sifat mampu sinter masing-masing serbuk dapat diketahui melalui perubahan dimensi pelet selama penyinteran yang ditampilkan dalam bentuk kurva dilatometer yang ditunjukkan pada Gambar 1a, b, c dan d. Berdasarkan kurva ini diperoleh informasi tentang penyusutan (*shrinkage*) pelet selama proses penyinteran. Informasi tersebut berupa tingkat keaktifan serbuk yang ditandai dengan temperatur dimulainya proses penyusutan dan laju penyusutan yang dapat diukur melalui kemiringan (*slope*) masing-masing kurva. Semakin curam kurva tersebut mengindikasikan bahwa laju penyusutan semakin besar.



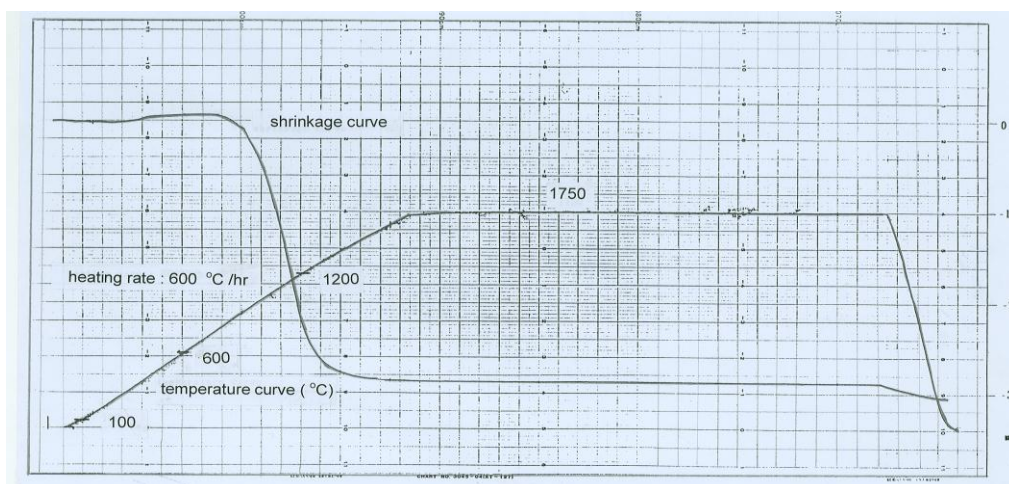
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 1. Kurva Dilatometer masing-masing pelet berbahan baku serbuk UO_2 : (a) ADU, (b) AUC, (c) IDR, (d) *Modified* ADU

Berdasarkan kurva pada Gambar 1 dan data rekaman dilatometer dapat diketahui temperatur saat terjadi penyusutan pada pelet mentah masing-masing serbuk selama penyinteran sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 2. Dari kurva dilatometer, Tabel 2 dan 3

terlihat tingkat keaktifan masing-masing serbuk ditandai dengan temperatur dimulainya terjadi penyusutan dan laju penyusutan. Laju penyusutan diukur dari *slope* masing-masing kurva seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Temperatur penyusutan pelet selama penyinteran

Serbuk	Temperatur mulai terjadi penyusutan (°C)	Temperatur laju penyusutan maksimum (°C)	Temperatur saat tidak terjadi lagi penyusutan (°C)
ADU	890	1400	1750
AUC	730	1190	1700
IDR	790	1350	1750
<i>Modified</i> ADU	740	1160	1450

Tabel 3. *Slope* kurva Dilatometer serbuk

Serbuk	Luas muka spesifik serbuk (m ² /g)	<i>Slope</i> kurva Dilatometer
ADU	2,12	-1,8
AUC	5,50	-3,2
IDR	2,10	-2,0
<i>Modified</i> ADU	9,20	-4,6

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa proses penyinteran terdiri dari dua tahap yaitu tahap penyusutan (densifikasi) pelet dan tahap pertumbuhan butir pada pelet. Pada saat penyusutan pelet sudah tidak terjadi lagi menandakan tahap pertumbuhan butir dimulai. Dari Tabel 2 terlihat bahwa pertumbuhan butir serbuk *Modified* ADU dimulai pada temperatur 1450°C.

Berdasarkan Gambar 1a, b, c dan d serta data pada Tabel 2 dan 3 terlihat bahwa serbuk yang mempunyai mampu sinter baik atau yang paling aktif adalah serbuk *Modified* ADU. Hal ini didukung oleh beberapa fakta yaitu temperatur saat mulai terjadi penyusutan lebih rendah, laju penyusutan terbesar

dan saat tahap pertumbuhan butir dimulai paling rendah jika dibandingkan dengan ketiga serbuk lainnya. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa luas muka serbuk yang tinggi dapat meningkatkan laju penyinteran melalui peningkatan energi aktivasi permukaan^[4]. Dengan demikian energi yang diperlukan untuk proses itu dapat diturunkan sehingga proses penyusutan dapat terjadi lebih awal dan temperatur sintering pun dapat diturunkan dari temperatur penyinteran yang umum dilakukan yaitu pada temperatur 1600 - 1800°C^[11].

Selain keaktifan serbuk, sifat mampu sinter ini juga dapat diindikasikan dari densitas yang mampu dicapai oleh pelet sinter pada

temperatur penyinteran tertentu. Serbuk dengan mampu sinter yang baik akan memberikan densitas tinggi pada temperatur penyinteran yang lebih rendah. Untuk itu dapat digunakan data densitas pelet dari tungku

sinter tanpa dilatometer saat dicapai temperatur 1450 °C, 1600 °C dan 1750 °C dengan waktu sinter 4 jam seperti terlihat pada Tabel 4.

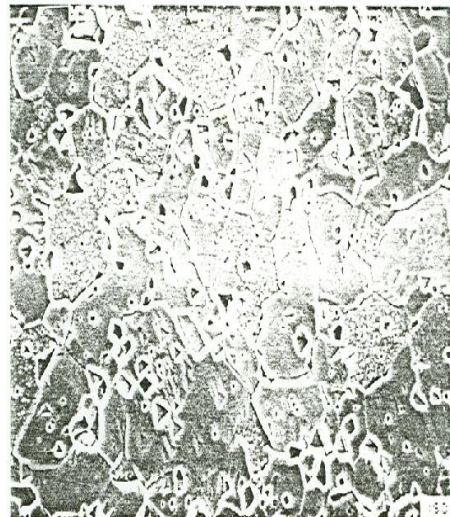
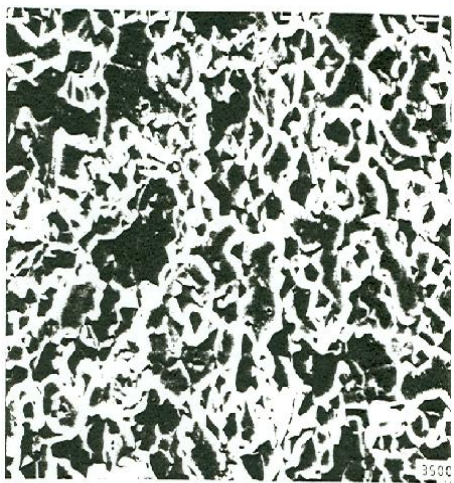
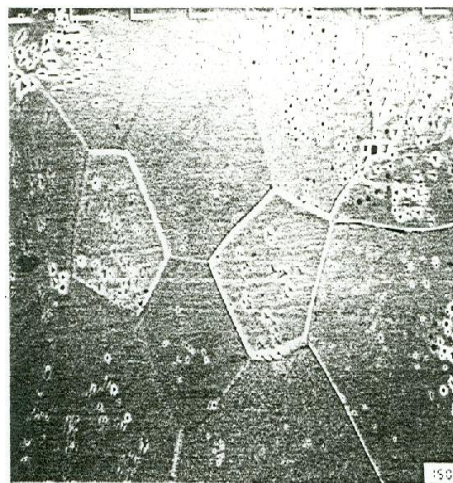
Tabel 4. Densitas pelet sinter dengan waktu sinter 4 jam

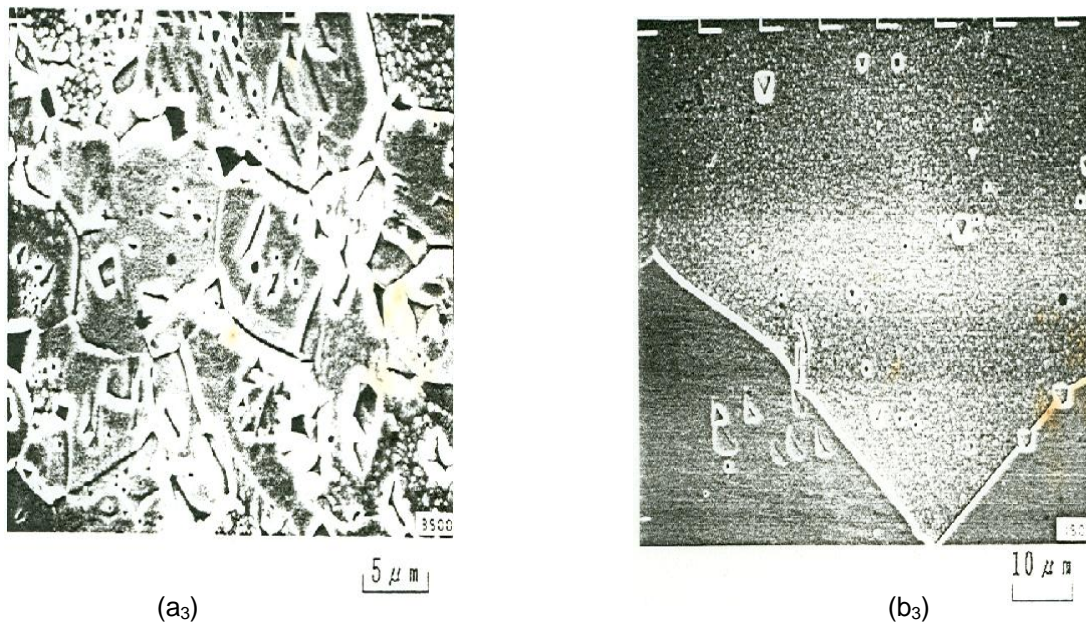
Serbuk	Densitas pelet sinter pada temperatur sinter 1450 °C (%TD)	Densitas pelet sinter pada temperatur sinter 1600 °C (%TD)	Densitas pelet sinter pada temperatur sinter 1750 °C (%TD)
ADU	89,27	93,69	95,51
AUC	96,24	96,64	96,88
IDR	95,91	97,75	98,22
<i>Modified</i> ADU	98,45	98,91	99,03

Berdasarkan Tabel 3 dan Tabel 4 terlihat bahwa serbuk *modified* ADU dengan luas muka spesifik yang besar mempunyai mampu sinter yang baik ditunjukkan dengan densitas pelet sinter paling tinggi dicapai pada temperatur sinter paling rendah dibanding serbuk lainnya.

Struktur mikro pelet yang berkaitan dengan sifat mampu sinter dapat dilihat dari mikrograf SEM pada Gambar 2a untuk pelet sinter dari serbuk ADU dan Gambar 2b untuk pelet dari serbuk *Modified* ADU. Gambar tersebut memperlihatkan proses pertumbuhan butir sebagai tahap akhir proses penyinteran. Pada Gambar 2a₁ dan a₂ terlihat bahwa pada pelet sinter dari serbuk ADU untuk temperatur sinter 1450°C dan 1750°C masih berlangsung proses penyatuan butir dan belum terbentuk batas butir. Pembentukan batas butir dan pertumbuhan butir berlangsung selama 4jam setelah dicapai temperatur sinter 1750°C sebagaimana diperlihatkan oleh mikrograf pada

Gambar 2a₃. Ukuran butir pelet sinter pada kondisi tersebut sudah memenuhi persyaratan yaitu berkisar antara 5–25 µm. Pembentukan batas butir pada pelet sinter dari serbuk *Modified* ADU sudah terjadi pada temperatur 1450 °C seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 2b₁. Dengan naiknya temperatur dan berjalannya waktu, pertumbuhan butir terus berlangsung dan ukuran butir makin besar. Hal ini diperlihatkan oleh Gambar 2b₂ untuk pelet sinter dari serbuk *Modified* ADU. Pada temperatur sinter 1750 °C , ukuran butir pada pelet sinter tersebut sudah memenuhi persyaratan. Apabila waktu penyinteran diperpanjang, butir akan terus tumbuh dan melebihi batas maksimal seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2b₃. Hal ini memberikan alternatif bahwa untuk mendapatkan ukuran butir sesuai persyaratan, pelet dari serbuk *Modified* ADU dapat disinter pada temperature 1450 °C sedangkan waktu sinter (*hold time*) yang diperlukan untuk itu belum diperoleh.

(a₁)(b₁)(a₂)(b₂)



Gambar 2. Mikrograf SEM pelet sinter yang menggunakan : a. Serbuk ADU (a_1 . $T=1450^{\circ}\text{C}$, a_2 . $T=1750^{\circ}\text{C}$, a_3 . $T=1750^{\circ}\text{C}$ dan waktu sinter 4 jam), b. Serbuk *modified* ADU (b_1 . $T=1450^{\circ}\text{C}$, b_2 . $T=1750^{\circ}\text{C}$, b_3 . $T=1750^{\circ}\text{C}$ dan waktu sinter 4 jam)

SIMPULAN DAN SARAN

• Simpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan diatas dapat disimpulkan bahwa serbuk *modified* ADU dengan luas muka spesifik $9,20 \text{ m}^2/\text{g}$ mempunyai mampu sinter yang paling baik diantara keempat serbuk UO_2 tersebut. Hal ini ditandai dengan tingkat keaktifan dan laju penyusutan pelet yang tinggi selama penyinteran. Serbuk tersebut mampu mencapai densitas pelet akhir 98,45 %TD pada temperatur sinter 1450°C selama 4 jam dan densitas 98,45 %TD pada temperatur sinter 1750°C tanpa *hold time* (tungku langsung dimatikan saat temperatur penyinteran tercapai).

• Saran

Disarankan agar melakukan penelitian lanjutan untuk menentukan waktu sinter

yang tepat untuk penyinteran pelet dari serbuk *modified* ADU pada temperatur sinter 1450°C . Disarankan pula untuk melakukan analisis distribusi ukuran partikel masing-masing serbuk UO_2 agar dapat membuktikan bahwa distribusi ukuran tersebut berpengaruh pada fenomena penyinteran yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

1. YANAI, K., ISHIMOTO, S., KUBO, T., ITA, K., ISHIKAWA, T., HAYASHI, H., "Characterization of Ceramic Powder Compacts", Journal of Nuclear Material, Vol.224 (1), (1995), p. 79-84.
2. HECKEL, R. W., "An Analysis of Powder Compaction Phenomena", Transaction of the Metallographical Society of AIME, Vol. 221, (1961).

3. RANDHAL et. al., "*Powder Metallurgy Science*", Princeton, New Jersey, 1989, 9 114.
4. DORR W. & ASSMANN H., 1980, "*Sintering of UO_2 at Low Temperatures*", Proc. 4th Intern. Meeting on Modern Ceramics Technologies, Saint Vincent, Italy, 28-31 May 1979.
5. TAYLOR, A.J., "*Characterization of Uranium Dioxide Powder for Sintering*", Meeting on Characterization of Uranium Dioxide, US Atomic Energy Commission of Technical Information, 1961.
6. RAHMAWATI M., "Karakterisasi Serbuk UO_2 (Cameco) Untuk Fabrikasi Pelet UO_2 Tipe CANDU", Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir III, PEBN-BATAN Jakarta, 4-5 Nopember 1997, hal. 175 -184.
7. GOETZEL C. G., "*Treatise on Powder Metallurgy*", ed 1, Interscience Publisher Ltd., 1949.
8. JONES, W. D., "*Fundamental Principles of Powder Metallurgy*", Ed. I, Edward Arnold (Publisher) L TD, London, 1960.
9. REED, JANS S., "*Introduction to the Principles of Ceramic Processing*", Powder Metallurgy, p. 188.
10. WIDJAKSANA, ETTY MUTIARA, "Pengaruh Komposisi Serbuk Halus UO_2 Terhadap Kerapatan Kompakan Pelet UO_2 ", Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir III, PEBN-BATAN Jakarta, 4-5 Nopember 1997, hal. 269 – 279.
11. ASSMANN H, DOERR W, PEEHS M., "*Control of UO_2 Microstructure by Oxidative Sintering*", Journal of Nuclear Material, North Holland, Amsterdam, (1986).